



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9484>

To cite this version :

Floriane LAVERNE, Frédéric SEGONDS, Nabil ANWER, Marc LE COQ - Conception pour la fabrication additive : un état de l'art - 2015

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Conception pour la fabrication additive : un état de l'art

Floriane Laverne
LCPI, Arts et Métiers ParisTech
151, boulevard de l'Hôpital, 75013
Paris – France
floriane.laverne@ensam.eu

Nabil Anwer
LURPA, ENS Cachan
61, avenue du Président Wilson, 94235
Cachan – France
anwer@lurpa.ens-cachan.fr

Frédéric Segonds
LCPI, Arts et Métiers ParisTech
151, boulevard de l'Hôpital, 75013
Paris – France
frederic.segonds@ensam.eu

Marc Le Coq
LCPI, Arts et Métiers ParisTech
151, boulevard de l'Hôpital, 75013
Paris – France
marc.lecoq@ensam.eu

Résumé— *La conception pour la fabrication additive ou Design For Additive Manufacturing (DFAM) est aujourd'hui un enjeu majeur pour exploiter de manière adaptée le potentiel de la fabrication additive dans l'élaboration de produits. Cependant les méthodes actuellement proposées sont multiples et ont des finalités variées. L'objectif de cet article est donc d'en étudier les fondements scientifiques et de proposer une classification en s'appuyant sur les notions de représentation intermédiaire et de niveau systémique du produit. Nous chercherons ensuite à en présenter les limites dans un contexte de conception de produits innovants.*

Mots-clés— *Fabrication additive, Design For Additive Manufacturing, Innovation*

I. CONTEXTE

Face à une économie mondialisée et toujours plus concurrentielle, l'innovation est aujourd'hui un levier indispensable aux entreprises pour se développer ou subsister. L'innovation technologique permise par la Fabrication Additive (FA) bouleverse la manière de produire. En permettant d'apporter la matière couche par couche uniquement là où elle est nécessaire, la FA s'oppose aux procédés traditionnels basés sur les approches soustractives ou formatives [1]. De plus, l'arrivée de ce procédé à sa phase de maturité amène aujourd'hui les entreprises à vouloir exploiter la fabrication directe [2], c'est-à-dire la fabrication de produits finis et fonctionnels, pour réaliser des produits innovants [3, 4]. En effet, les perspectives offertes sont multiples : réduction des coûts et des délais de fabrication grâce à la suppression des outillages, augmentation de la richesse fonctionnelle des produits, allègement structural, fabrication sur mesure de formes complexes ou exploitation de la complexité matériaux [5-7].

Cependant, peu d'études ont été faites pour repenser la conception des pièces [8]. Le concepteur continue de travailler avec une démarche « traditionnelle ». Or aujourd'hui, les phases amont ont un impact majeur sur le coût des produits :

80% du coût final est fixé lorsque seulement 5% des coûts de développements ont été engagés [9, 10]. Il devient donc crucial de mettre à disposition du concepteur des méthodes et outils qui lui permettent de prendre en compte les spécificités de la FA et qui s'intègrent au sein de l'éco système informationnel et humain déployé dans les entreprises : le Product Lifecycle Management (PLM) [11].

II. DU DESIGN FOR X AU DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING

A. Le Design For X

D'après Demoly [12], les études menées dans le domaine du PLM mettent « en exergue des besoins d'une gestion intelligente et efficace des informations, afin de pouvoir intégrer les contraintes métiers dès les phases préliminaires du processus de développement des produits ».

C'est dans cet objectif qu'a été mise en place l'approche Design For X (DFX) ; destinée à rendre explicites les connaissances liées aux métiers se situant en aval des phases² de conception (production, la maintenance ...) [13-15]. L'apport attendu du DFX est à la fois l'amélioration de la compétitivité (augmentation de la qualité produit, diminution du time to market, ...) mais aussi l'aide à la rationalisation des décisions et l'augmentation de l'efficacité opérationnelle des concepteurs, et ce dès les phases amonts de conception.

Le déploiement d'un DFX, pour être réussi, doit s'appuyer sur :

- la gestion des connaissances pluridisciplinaires relatives au triptyque produit / procédé / matériau
- la gestion des niveaux d'abstraction et de représentation du produit appelés Représentation Intermédiaire (RI) [16] (briefs, esquisses, prototypes, ...)
- l'utilisation d'outils et de démarches permettant l'intégration des contraintes métier.

Ce déploiement n'est donc possible que dans un environnement PLM dans lequel en particulier, l'ensemble des données utiles à la conception sont stockées et rendues

accessibles pour tous via les systèmes de gestion des données techniques (SGDT).

Ainsi, au regard de ce qui a été proposé pour l'assemblage (Design For Assembly) ou pour la fabrication (Design For Manufacturing), Bourell et al [17] recommandent le développement de nouvelles méthodes de conception dédiées à la fabrication par couche et permettant de combler ce manque : c'est le Design For Additive Manufacturing (DFAM) ou la conception pour la fabrication additive.

B. Fondements du DFAM

Le DFAM est l'ensemble des méthodes et outils permettant de prendre en compte les spécificités de la fabrication additive (technologiques, géométriques,...) lors des phases de conception [18].

Selon Pahl and Beitz [19], "each step of the design process must be evaluated, evaluation serves as a check on progress towards the overall objective". De cette affirmation et à l'image des autres approches DFX, nous classons les méthodes DFAM en 2 catégories : les DFAM Conception et les DFAM Evaluation.

Les méthodes DFAM Conception sont destinées à faciliter la démarche de conception du concepteur [20-27]. Elles conduisent, selon la phase de conception pour laquelle elles sont appliquées, à l'élaboration d'une RI numérique ou physique du produit. Généralement ce sont des guidelines, des procédures ou des bases de règles et de cas.

Les méthodes DFAM Evaluation confrontent, quant à elles, la RI créée à des critères d'acceptabilité vis des objectifs initiaux fixés (coût, capacité des machine FA, fabricabilité du concept avec la technologie FA, ...) [28-31].

Il existe donc une relation entre ces 2 catégories de DFAM (Figure 1) puisque la création d'une RI implique sa validation voire sa modification (actions correctives au sens de Aoussat and Le Coq [32]).

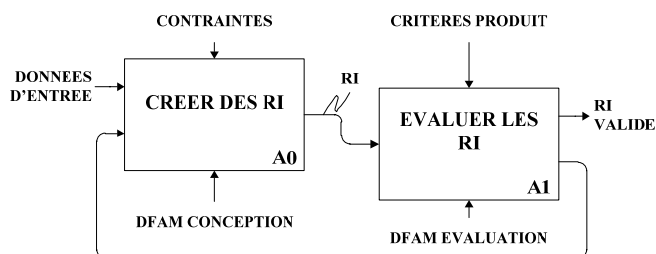


Figure 1 Relation entre DFAM Evaluation et DFAM Conception pour une phase du processus de conception

Cependant, face à l'enjeu de réduction des coûts liés aux modifications tardives de la conception, les besoins en DFAM résident aujourd'hui dans une approche DFAM englobant la conception et l'évaluation et se positionnant sur les phases qui ont le plus d'impact : les phases amont [33].

D'autre part, une étude approfondie des DFAM Conception nous amène à proposer une distinction parmi les approches visées pour la génération des RI. Ainsi nous proposons d'introduire les concepts de DFAM Opportunités, de DFAM Contraintes et de DFAM Globales.

Les DFAM Opportunités permettent au concepteur de générer des RI en exploitant la complexité géométrique (forme non fabricable en procédé traditionnel) et la complexité matériau (possibilité de fabrication multi-matériaux) permise par la FA. L'objectif est donc d'aider le concepteur à explorer des formes et des concepts nouveaux pour une approche créative en s'appuyant sur le postulat suivant [5, 34] : il n'existe aucune limitation de forme ou de répartition du ou des matériaux. Nous plaçons ici les méthodes fondées sur les techniques d'optimisation (paramétriques ou topologiques) [20, 21] ou celles exploitant la mise en place de structures élémentaires de type treillis [35], cellulaires [36] ou bioniques [23] dans les produits.

Les DFAM Contraintes cherchent à tenir compte des limites de la FA en terme de matériaux utilisables, de caractéristiques procédé ou de fabricabilité du produit [24-27]. Leur objectif est donc de conduire à une convergence entre le modèle géométrique nominal correspondant à une représentation idéale (sans défaut) de la RI et le skin model [37] intégrant les variations géométriques attendues ou prévues lors des processus de fabrication et correspondant donc à une représentation réaliste de la RI.

Dans une perspective d'innovation produit, nous pensons que les méthodes DFAM qui associent les approches Opportunités et Contraintes semblent les plus adaptées. En effet, elles seules exploitent de façon réaliste les potentialités de la FA. Nous nommons ces méthodes les DFAM Globales. Notre étude, menée sur 25 publications relatives aux DFAM Conception [5, 6, 8, 20-27, 34-36, 38-48], montre que malgré leur importance en terme d'innovation, ces DFAM Globales sont aujourd'hui minoritaires (Figure 2).

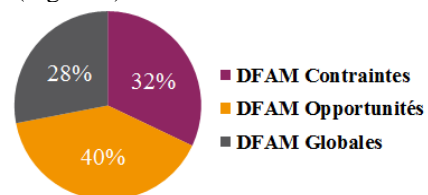


Figure 2 Classification des DFAM Conception

La classification que nous proposons (Figure 3) se base donc avant tout sur le type de livrable créé par le concepteur lors de l'utilisation d'une méthode DFAM (RI ou RI validée). D'autre part nous distinguons les moyens à disposition du concepteur pour créer une RI et nous y ajoutons les méthodes Globales auxquelles le prochain chapitre est consacré et dans lequel nous étudierons leurs démarches scientifiques.

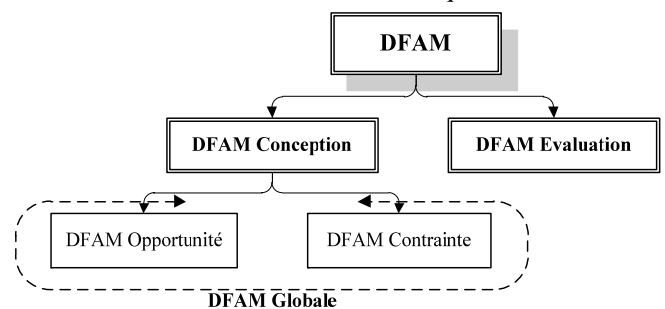


Figure 3 Classification des DFAM

III. ANALYSE DES DFAM GLOBALES.

A. Niveau systémique des DFAM

Un produit se définit comme un artefact technique, tangible et dénombrable, dont la propriété peut être transférée et possédant différents niveaux de complexité [19, 49]. Sous une appellation commune « produit » coexistent ainsi plusieurs dénominations que nous classons par ordre de complexité croissante : composant ou pièce, assemblage ou mécanisme (ensemble de composants), machine et usine.

En se basant sur cette définition, nous proposons de séparer les DFAM en fonction du niveau systémique visé pour le produit. Notre état de l'art relatif aux DFAM Conception montre qu'il n'existe que deux approches produit différentes: les DFAM Composant et les DFAM Assemblage. Comme l'illustre la Figure 4, les DFAM proposées pour la conception d'assemblages sont beaucoup moins développées que les celles destinées à des composants (respectivement 12% et 88% des publications).

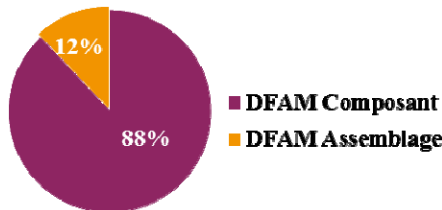


Figure 4 Répartition des DFAM globales suivant le niveau systémique du produit

Aux vues de ce constat, nous allons successivement étudier les DFAM Globale de niveau composant et de niveau assemblage.

B. DFAM Globale Composant

Ces DFAM ont pour finalité une conception adaptée et optimisée pour la FA d'une pièce. Il en existe deux grandes familles qui se distinguent par les données d'entrées sur lesquelles elles s'appuient.

Les DFAM proposées par Ponche, et al. [43] ou Vayre, et al. [8] (à gauche sur la Figure 5) ont pour point de départ l'ensemble des entités géométriques fonctionnelles du composant à concevoir. Ces entités fonctionnelles ont été obtenues à partir d'un cahier des charges du composant préalablement établi et servent à définir le domaine de conception.

Ces deux méthodes cherchent dans un premier temps à aider le concepteur à « surmonter certains freins psychologiques » [50]. Il s'agit donc d'utiliser une approche Opportunité dès l'élaboration de la forme initiale de la RI. Pour cela les auteurs proposent, l'utilisation d'outils d'optimisation topologique et paramétrique ainsi que la modélisation géométrique par entités de type peau/squelette [51]. Vayre préconise également de générer des formes sans dimension.

La deuxième étape est alors l'exploitation de l'approche Contrainte pour faire évoluer la forme initiale. Cette étape passe par l'optimisation et conduit à une forme optimisée qui est désormais dimensionnée et respecte les contraintes produit et procédé qui ont été fixées.

Une nouvelle étape basée également sur l'approche Contrainte va permettre de transformer la forme optimisée en une forme finale fabricable. Elle implique des modifications géométriques liées à la prise en compte de la stratégie de fabrication à travers de la modélisation multi-physique du procédé utilisé (Ponche) mais aussi, dans le cas de Vayre, à l'intégration des contraintes de finition (suppression des supports, état de surface) et des coûts de fabrication.

La dernière étape consiste alors en une évaluation finale de la géométrie quant au respect des performances spécifiées par le cahier des charges.

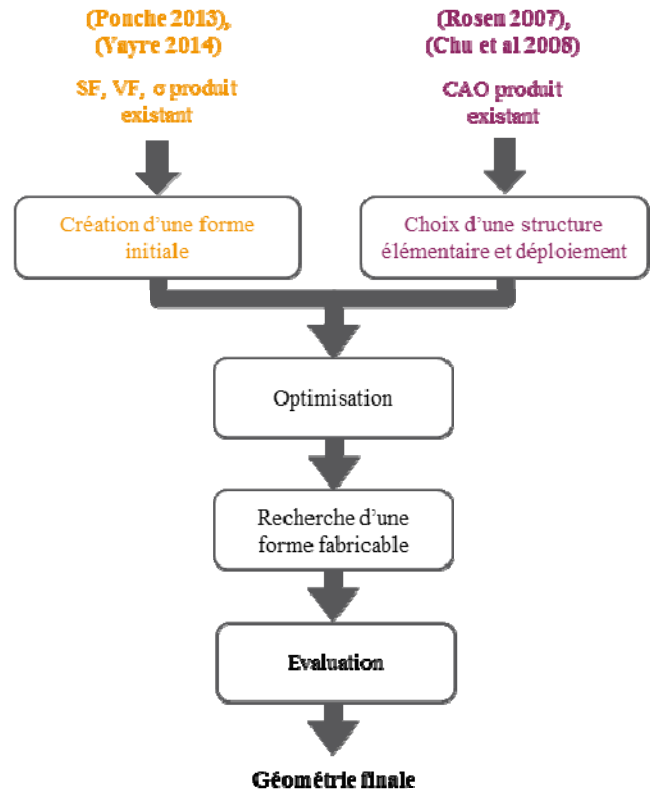


Figure 5 Workflow des DFAM Globales Composant

Rosen [6] et Chu, et al. [22] (à droite sur la Figure 5) proposent une démarche assez semblable à celles présentées précédemment. La différenciation se fait sur les données d'entrée nécessaires et leur traitement au cours de l'étape de création de la forme initiale. Leur méthode utilise une modélisation géométrique du composant et plus seulement sur des entités géométriques.

On retrouve l'approche Opportunité pour la création d'une forme initiale mais celle-ci s'appuie sur le choix de structures treillis paramétrées qui seront déployées dans la CAO.

La forme initiale passe également par la phase d'optimisation paramétrique et topologique dont l'objectif est de trouver, à l'aide d'outils de calcul par éléments finis, une taille et une répartition des structures élémentaires garantissant le respect des contraintes produit.

Ensuite, comme dans le cas des DFAM de Ponche et de Vayre, la forme optimisée est alors confrontée aux contraintes de fabrication du procédé FA. Les dimensions des structures

élémentaires sont comparées aux dimensions minimales fabricables et permettent l'adaptation de la forme pour la rendre réaliste. Enfin, la RI est validée en fonction des exigences initiales.

C. DFAM Globale Assemblage

Ces méthodes s'intéressent à la conception adaptée et optimisée pour la FA de produit au sens assemblage. Il est possible de scinder ces démarches en deux familles distinctes.

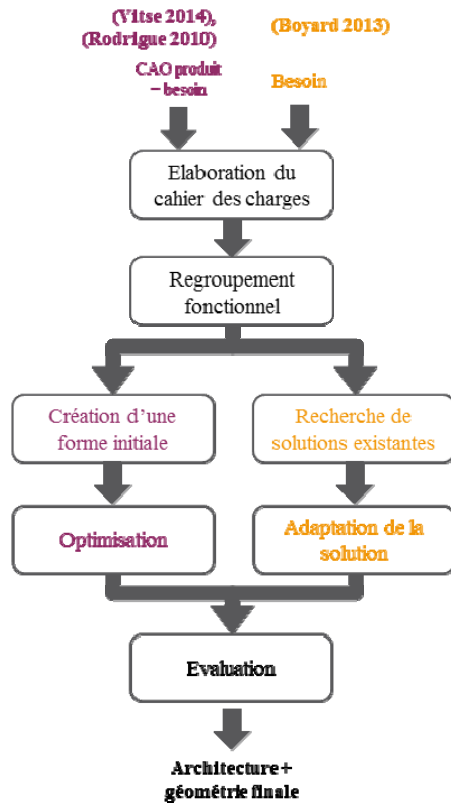


Figure 6 Workflow des DFAM Globales Assemblage

La première famille de DFAM Globale Assemblage peut être illustrée par les méthodes de Rodrigue and Rivette [44] ou Vitse, et al. [45]. Elles ont pour objectif la consolidation d'un assemblage existant et peuvent se décomposer en 5 étapes successives (à gauche Figure 6).

La 1^{ère} étape consiste en l'élaboration d'un nouveau cahier des charges à partir des fonctions actuelles du produit et des fonctions supplémentaires souhaitées.

Une fois le cahier des charges établi, des regroupements de fonctions sont proposés au sein de sets fonctionnels. Les regroupements possibles sont identifiés à l'aide de Force-Flow Diagram [52] et d'AMDEC dans le cas de Rodrigue et par des études d'incompatibilité entre les matériaux choisis et les chargements appliqués sur le produit pour Vitse. Cette étape sert donc à définir une architecture produit et à fixer le cahier des charges de chaque composant associé à un set géométrique.

La phase de conception de chaque composant peut alors démarrer. Comme pour les DFAM Composant, une forme initiale est tout d'abord définie pour chacun des sets

fonctionnels puis elle est ensuite adaptée à l'aide de méthodes d'optimisation topologique (Vitse) ou de prévention des défaillances (Rodrigue). Pour finir la forme finale est validée en fonctions de critères économiques ou mécaniques.

La démarche développée par Boyard, et al. [42] (à droite Figure 6) se distingue par le fait qu'elle est destinée à la fois à la conception de produits nouveaux mais aussi à la reconception de produits existants dans la mesure où sa donnée d'entrée est uniquement le besoin client.

Les 2 premières étapes reposent sur une analyse fonctionnelle du produit puis une recherche de regroupements des fonctions au sein de sets. La représentation 3D des sets dont la disposition spatiale peut être modifiée en fonction des besoins du concepteur conduit alors à proposer des architectures de produit.

Afin de définir une géométrie pour chacun des sets fonctionnels, Boyard propose d'exploiter une approche de conception par analogie et d'identifier dans une base de cas des sets similaires au sien. Le travail du concepteur consiste alors à réutiliser ou adapter suivant ses contraintes la géométrie du set similaire de façon à disposer d'une forme initiale pour le set qu'il étudie.

La finalisation de l'assemblage et de chaque composant se fait en fonction des contraintes de procédé, d'assemblage ou de fabrication et peut amener à des itérations au niveau de la représentation 3D.

Pour finir, la validation de la conception se fait au niveau de la fabricabilité et de l'assemblabilité des composants.

IV. CONSTATS ET MANQUES DES DFAM GLOBALES

Suite à l'état de l'art présenté, notre premier constat est qu'en fonction de la finalité des DFAM Globales (composant ou assemblage), la place accordée aux phases amont n'est pas la même. Ainsi, les DFAM Composant cherchent avant tout à proposer une démarche au terme de laquelle la forme de la RI sera innovante mais fidèle au produit fabriqué. Les phases d'analyse du besoin et de rédaction du cahier des charges ne rentrent pas dans leur cadre d'étude. Seul le tracé préliminaire du composant (création de la forme initiale) fait ici partie du travail de conception amont.

Dans le même temps, les DFAM Assemblage accordent une place centrale aux phases amont (depuis l'analyse du besoin jusqu'à la proposition de principe de solution). L'enjeu est ici de prendre en compte les avantages offerts par la FA pour (re)penser le produit à la fois au niveau de son architecture mais aussi de ses composants et plus particulièrement de leur géométrie.

Cela nous amène à nous interroger sur les possibilités d'innovation produit offertes par une approche de niveau composant et une approche de niveau assemblage.

Les DFAM Composant supposent que les analyses fonctionnelles et structurelles réalisées au préalable et permettant d'établir le cahier des charges initial sont « fiables ». Or ces méthodes DFAM portent sur la reconception d'un composant. Elles utilisent donc une modélisation du produit qui a été réalisée avec une approche

traditionnelle (soustractive ou formative) et non pas additive. Nous pensons que le cahier des charges et l'architecture qui en découlent, bien qu'ils garantissent une innovation au niveau du composant, ne permettent pas l'innovation sur des niveaux systémiques produit plus élevés. Or l'innovation produit permise par la FA est-elle juste une innovation sur la forme de chacun des composants ? Ne faut-il pas remettre en question ou redéfinir les entités fonctionnelles qui conditionnent le tracé de la forme initiale de chaque composant ? Nous défendons l'idée que l'architecture produit doit être remise en question notamment lorsque les contraintes sur le composant à concevoir sont trop nombreuses ou trop restrictives en termes de liberté géométrique.

Par ailleurs, les DFAM Assemblage, pour lesquelles la recherche d'architecture produit occupe une place centrale dans les phases amont, conduisent cependant à des principes de solutions assez peu innovantes. En effet, bien qu'elles obligent le concepteur à repenser son cahier des charges, elles brident les possibilités d'innovation dans la mesure où la forme initiale des composants dépend :

- Soit d'une architecture que l'on cherche à consolider et dans laquelle les regroupements fonctionnels non impactés par la FA ne sont jamais remis en question,
- Soit d'une démarche par analogie qui va réutiliser des solutions déjà existantes.

D'autre part, ces DFAM Assemblage ne considèrent que l'aspect statique, c'est-à-dire sans mobilité des composants et non des mécanismes. Or l'un des atouts majeurs de la FA est de permettre la fabrication de pièces déjà assemblées, prêtes à l'usage et au fonctionnement. La prise en compte des aspects cinématique et dynamique des produits doit permettre d'explorer de nouveaux regroupements fonctionnels donc de nouvelles architectures produit et ainsi favoriser davantage l'innovation.

Enfin, le dernier point que nous soulignons porte sur la validation des DFAM. Quel que soit le niveau systémique visé, l'évaluation de la conception est effectuée au niveau du composant et non de l'architecture. Cette vision n'est pas satisfaisante car elle sous-entend qu'il faut avoir conçu chaque composant pour valider l'assemblage. On peut imaginer les conséquences en termes de coûts et de délais lorsque la conception n'est pas validée.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons analysé différentes méthodes DFAM et proposé de les classer en fonction des « aides » qu'elles apportaient au concepteur (notion de conception et d'évaluation). Nous avons ensuite montré que, parmi les DFAM Conception permettant la création d'une RI deux orientations majeures se distinguaient : l'exploitation des opportunités permises par la FA et l'intégration des contraintes inhérentes à la FA. Nous avons souligné que dans un contexte d'innovation, les méthodes que nous appelons DFAM Globales et couplant ses deux orientations étaient les plus adaptées. Puis nous avons mis en avant l'importance du niveau systémique produit visé (Composant et Assemblage) pour les DFAM Conception. Enfin, nous avons étudié les

méthodes DFAM Globales destinées aux composants et aux assemblages et nous avons montré que les perspectives d'innovation produit offertes demeuraient essentiellement du domaine de la reconception.

Cette synthèse de l'état de l'art est le fruit d'un travail de recherche dont la finalité est l'intégration de la fabrication additive pour favoriser l'innovation produit dans un contexte PLM. Aux vues des différents constats que nous faisons, nous expérimentons une nouvelle méthodologie DFAM s'appuyant sur un niveau systémique produit élevé et destinée à proposer dès les phases amont des pistes de conception innovante.

VI. REFERENCES

- [1] AFNOR, "Fabrication additive - Vocabulaire," vol. NF E67-001, ed: AFNOR, 2011, p. 4.
- [2] N. Hopkinson, R. Hague, and P. Dickens, *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] R. J. Sternberg, J. E. Pretz, and J. C. Kaufman, "A propulsion model of creative leadership," *The Leadership Quarterly*, vol. 14, pp. 455-473, 2003.
- [4] S. Buisine, "Ergonomie pour l'innovation," Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches en Ergonomie, Université Paris Descartes, 2013.
- [5] R. Hague, I. Campbell, and P. Dickens, "Implications on design of rapid manufacturing," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, pp. 25-30, 2003.
- [6] D. W. Rosen, "Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 4, pp. 585-594, 2007.
- [7] I. Gibson, D. R. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer US, 2010.
- [8] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Designing for Additive Manufacturing," presented at the CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2012.
- [9] F. Segonds, "Contribution à l'intégration d'un environnement collaboratif en conception amont de produits," Thèse de doctorat, LCPI & LSIS, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2011.
- [10] D. G. Ullman and E. A. Jones, *The Mechanical Design Process*: McGraw - Hill Higher Education, 2003.
- [11] M. Garetti, S. Terzi, N. Bertacci, and M. Brianza, "Organisational change and knowledge management in PLM implementation," *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 1, pp. 43-51, 2005.
- [12] F. Demoly, "Conception intégrée et gestion d'informations techniques: application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage," Thèse de doctorat, M3M, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [13] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind, and F. Kimura, "Design methodologies: Industrial and

- educational applications," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 543-565, 2009.
- [14] M. Tichem and T. Storm, "Designer support for product structuring - Development of a DFX tool within the design coordination framework," *Computers in Industry*, vol. 33, pp. 155-163, 1997.
- [15] G. Q. Huang, *Design for X — Concurrent engineering imperatives*: Chapman & Hall, 1996.
- [16] C. Bouchard, R. Camous, and A. Aoussat, "Nature and role of intermediate representations (IR) in the design process: Case studies in car design," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 38, pp. 1-25, 2005.
- [17] D. L. Bourell, M. C. Leu, and D. W. Rosen, "Roadmap for Additive Manufacturing - Identifying the Future of Freeform Processing," The University of Texas at Austin 2009.
- [18] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq, "DFAM in the design process : A proposal of classification to foster early design stages " presented at the CONFERE, Sibenik, Croatia, 2014.
- [19] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design – A Systematic Approach*, 3rd Edition ed. London: Springer, 2007.
- [20] N. P. Fey, B. J. South, C. C. Seepersad, and R. R. Neptune, "Topology Optimization and Freeform Fabrication Framework for Developing Prosthetic Feet," in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2009.
- [21] N. Gardan and A. Schneider, "Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. In Press, 2014.
- [22] C. Chu, G. Graf, and D. W. Rosen, "Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 5, pp. 686-696, 2008.
- [23] C. Emmelmann, P. Sander, J. Kranz, and E. Wycisk, "Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design," *Physics Procedia*, vol. 12, Part A, pp. 364-368, 2011.
- [24] P. Muller, P. Mognol, and J. Hascoet, "Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 685-692, 2013.
- [25] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, pp. 248-257, 2002.
- [26] P. Kilburn, "Overview of Additive Manufacturing and Materials," CERN, Ed., ed. Zurich, 2012, p. 76.
- [27] G. A. O. Adam and D. Zimmer, "Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 7, pp. 20-28, 2014.
- [28] K. Lokesh and P. K. Jain, "Selection of rapid prototyping technology," *Advances in Production Engineering and Management*, vol. 5, pp. 74-134, 2010.
- [29] H. Byun and K. Lee, "A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, pp. 1338-1347, 2005.
- [30] P. Alexander, S. Allen, and D. Dutta, "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing," *Computer-Aided Design*, vol. 30, pp. 343-356, 1998.
- [31] M. Ruffo and R. Hague, "Cost estimation for rapid manufacturing - simultaneous production of mixed components using laser sintering," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, pp. 1585-1591, 2007.
- [32] A. Aoussat and M. Le Coq, "Contraintes d'assemblage," in *Conception de produits mécaniques - Méthodes, modèles et outils*, Hermes, Ed., ed, 1998, pp. 185-200.
- [33] L. Wang, W. Shen, H. Xie, J. Neelamkavil, and A. Pardasani, "Collaborative conceptual design: state of the art and future trends," *Computer Aided Design*, vol. 34, pp. 981-996, 2002.
- [34] Z. Doubrovski, J. C. Verlinden, and J. M. Geraedts, "Optimal design for additive manufacturing : opportunities and challenges," in *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2011, pp. 635-646.
- [35] G. Reinhart and S. Teufelhart, "Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures," *Physics Procedia*, vol. 12, Part A, pp. 385-392, 2011.
- [36] C. B. Williams, F. Mistree, and D. W. Rosen, "Towards the Design of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure," in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2005, pp. 217-230.
- [37] N. Anwer, A. Ballu, and L. Mathieu, "The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 143-146, 2013.
- [38] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 593-606, 2007.
- [39] J. Chen, "Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry," Thèse de doctorat, Cranfield University, 2012.
- [40] G. F. Gerber and L. J. Barnard, "Designing for laser sintering," *Journal for New Generation Sciences*, vol. 6, pp. 47-59, 2008.
- [41] H. K. Rafi, T. L. Starr, and B. E. Stucker, "A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel

- parts made by selective laser melting.," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 69, pp. 1299 – 1309, 2013.
- [42] N. Boyard, M. Rivette, O. Christmann, and S. Richir, "A design methodology for parts using Additive Manufacturing," presented at the International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2013.
 - [43] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J. Hascoet, "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, pp. 389-398, 2014.
 - [44] H. Rodrigue and M. Rivette, "An assembly-level design for additive manufacturing methodology," presented at the IDMME - Virtual Concept 2010, Bordeaux, 2010.
 - [45] M. Vitse, F. Laverne, F. Segonds, S. Ratgras, L. Pellat Finet, and G. Yantio, "Fabrication additive : Integration du DFAM pour la conception petites et moyennes séries dans le domaine aérospatial," presented at the CONFERE, Sibenik, Croatia, 2014.
 - [46] S. Bin Maidin, "Development of a design feature database to support design for additive manufacturing," Thèse de doctorat, Loughborough University, 2011.
 - [47] D. Brackett, I. Ashcroft, and R. Hague, "Topology optimization for additive manufacturing," in *Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2011, pp. 6-8.
 - [48] U. Maheshwaraa, C. Seepersad, and D. L. Bourell, "Design and Freeform Fabrication of Deployable Structures with Lattice Skins," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, pp. 213-225, 2007.
 - [49] ISO, "Systèmes de management de la qualité : Principes essentiels et vocabulaire " vol. NF EN ISO 9000, ed: AFNOR, 2009.
 - [50] B. Vayre, "Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM," Thèse de doctorat, Laboratoire G-SCOP, Université de Grenoble, 2014.
 - [51] L. Roucoules, "Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin: des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication," Mémoire de HDR, LASMIS, Université de Technologie de Troyes, 2007.
 - [52] K. N. Otto and K. L. Wood, *Product Design - Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*, 2003.